

Cellules de Bénard dans la soupe *miso* et dans la couche limite atmosphérique

Olivier Boucher¹, Marie Doutriaux-Boucher²

¹ Laboratoire de météorologie dynamique, CNRS / Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris

² Eumetsat, Darmstadt, Allemagne

olivier.boucher@lmd.jussieu.fr

Le *miso* est un aliment japonais fabriqué à partir de graines de soja, de céréales et de sel marin. Il se présente sous la forme d'une pâte fermentée de couleur beige. On peut le trouver dans les épiceries asiatiques. Outre le *miso*, l'expérience proposée ici nécessite peu de matériel : une tasse, une cuillère, un plat et une bouilloire. Notre expérience consiste à mélanger le *miso* avec de l'eau bouillante dans une assiette creuse ou un plat. Avant de la réaliser, on peut demander au public de spéculer sur ce qui peut se passer dans le plat, de manière à rendre l'expérience plus interactive.

On prendra soin de commencer par diluer le *miso* dans une tasse avec un peu d'eau bouillante, afin d'éviter de faire des grumeaux (figure 1), puis de mélanger le contenu de la tasse avec le reste de l'eau bouillante dans un deuxième temps. Il peut être judicieux de chauffer le plat auparavant pour qu'il se refroidisse moins rapidement pendant l'expérience. Pour éviter toute déconvenue, il est conseillé de réaliser l'expérience une ou plusieurs fois en solo avant de la faire en public !

Formation de cellules

Une fois que le mouvement du liquide induit par le versement de l'eau chaude s'est ralenti et que le mélange s'est « stabilisé » dans le plat, on voit rapidement apparaître des régions où les particules de *miso* s'agglutinent et d'autres, sous la forme de filaments clairs, où au contraire le *miso* est en moindre quantité. En regardant attentivement, et de près, les mouvements du fluide, on se rend compte que les régions riches en *miso* sont celles où le liquide monte et qu'à l'inverse le liquide redescend dans les régions claires. On remarque ensuite, lorsque la soupe se refroidit, que les structures évoluent au cours du temps et que les régions claires s'agrandissent (figure 2). On peut répéter l'expérience ou bien l'effectuer simultanément dans plusieurs plats pour montrer sa reproductibilité. Bien sûr, les structures ne sont pas toujours aux mêmes endroits, mais, si l'expérience est bien faite, elles apparaissent à chaque fois.

À l'inverse, on pourrait partir d'un mélange froid que l'on chauffe progressivement, à condition de le faire à l'aide

But pédagogique : observer des cellules de convection et faire le lien avec les observations satellitaires de la couche limite atmosphérique.

Public : tout public, discours adaptable.

Matériel nécessaire : du *miso* japonais, de l'eau, une tasse, une cuillère, une grande assiette creuse ou un plat, une bouilloire électrique, éventuellement un chauffe-plat.



Figure 1. Préparation de l'expérience : on dilue le *miso* dans un peu d'eau bouillante. On mélangera ensuite le contenu de la tasse avec le reste de l'eau bouillante dans un plat.

d'un chauffe-plat ou d'une plaque électrique permettant un chauffage uniforme et constant. Cependant, l'expérience proposée ici a le mérite de la simplicité. Il est sans doute possible de reproduire ces observations avec autre chose que du miso japonais, mais pour avoir essayé divers mélanges d'ingrédients trouvés dans la cuisine, il semble que le *miso* donne les meilleurs résultats !

Interprétation

L'explication de l'expérience est assez simple. Une fois mélangé à l'eau, le *miso* forme ce qu'on appelle une solution colloïdale : il ne se dissout pas, mais produit une dispersion de particules en suspension. Ces particules sont suffisamment légères pour être entraînées par le fluide, mais étant soumises à leurs poids (ou plus précisément à la somme de leur poids et de la force d'Archimède), elles ne suivent pas exactement les mouvements du fluide et tendent à descendre lentement. Par ailleurs, la soupe n'a pas une température homogène. Elle se refroidit en effet plus vite en surface, au contact de l'air, que dans sa masse. Les différences de température créent des différences de densité. L'eau chaude, qui est plus légère, monte ; l'eau froide, plus dense, descend. Ces mouvements opposés ne peuvent coexister de manière désordonnée. Ils donnent lieu à l'apparition de structures ascendantes et descendantes qui forment des « cellules ». Dans un plan vertical donné, deux cellules adjacentes tournent dans des sens opposés. On peut vérifier qu'une petite perturbation ne vient pas modifier la convection au sein des cellules. Les cellules font donc preuve d'une certaine « inertie ». Par contre, une forte perturbation peut « casser » les cellules et entraîner une nouvelle configuration, à condition que la soupe soit encore assez chaude. D'une expérience à l'autre, les cellules ne se forment pas aux mêmes endroits et on ne peut prédire ni où elles se forment ni leur sens de rotation. Par contre, on peut prédire que des cellules vont se former. Les caractéristiques des cellules dépendent de la viscosité du fluide, de la température du système, de son taux de refroidissement et des dimensions physiques de l'expérience.

Cellules de Bénard

Les structures rencontrées dans la soupe *miso* s'appellent des cellules de Bénard, du nom du physicien français Henri Bénard qui est le premier à les décrire



Figure 2. Photographies du plat contenant la soupe de *miso* prises à intervalles réguliers (de gauche à droite et de haut en bas). Un film est disponible sur le site électronique de la revue.

au début du xx^e siècle. Elles résultent d'un processus d'auto-organisation, comme on en rencontre couramment en chimie, en biologie ou en physique. Pour les étudiants, on peut préciser qu'il s'agit là d'un système thermodynamique ouvert hors équilibre qui échange de l'énergie avec l'extérieur (système dissipatif). On peut introduire l'effet papillon – selon lequel de petites modifications de l'état initial entraînent des différences de grande ampleur dans les structures finales – et le concept d'attracteur – selon lequel on observe que, quelles que soient les conditions initiales, on obtient toujours une organisation en cellules¹. On peut se référer aux publications d'Okubo (2009) et d'Okubo *et al.* (2009) pour une analyse plus poussée des cellules de Bénard que l'on peut observer dans la soupe *miso*.

Et dans la couche limite atmosphérique ?

Si cette expérience nous intéresse tout particulièrement, c'est parce qu'elle représente un excellent analogue aux mouvements convectifs qui peuvent

prendre place dans la couche limite atmosphérique. La couche limite nuageuse se refroidit par émission de rayonnement infrarouge du sommet des nuages en direction de l'espace, ce qui est équivalent à notre plat de soupe *miso* qui, elle aussi, est refroidie « par le haut ». Les cellules convectives qui se développent peuvent être particulièrement stables comme au-dessus des océans. La figure 3 montre un exemple de cellules convectives de méso-échelle telles qu'on les voit par imagerie satellitaire. Les zones ascendantes sont nuageuses puisque le refroidissement adiabatique de la masse d'air conduit à la condensation de la vapeur d'eau, alors que les zones descendantes sont libres de nuage. Sur la figure 3a, les cellules sont « fermées » : les zones ascendantes sont majoritaires et les zones descendantes sont limitées à des couloirs entre les zones ascendantes, à l'image de ce que l'on observe dans la soupe *miso*.

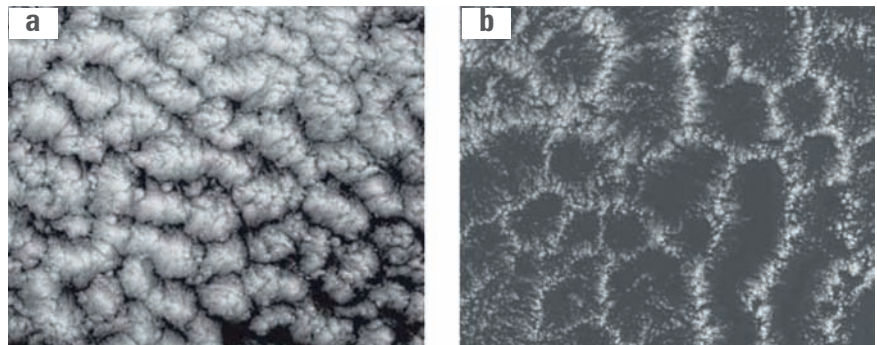


Figure 3. Exemple de cellules convectives de méso-échelle fermées (a) et ouvertes (b) observées par l'instrument MISR. D'après Garay *et al.* (2004). © American Meteorological Society. Reproduit avec permission.

1. On pourra noter que le système d'équations différentielles de Lorenz qui a permis de mettre en évidence le caractère chaotique de la météorologie repose sur un modèle très simplifié du phénomène de convection de Rayleigh-Bénard.

On peut aussi observer des cellules dites « ouvertes », lorsque les zones de subsidence dominent (figure 3b). Dans ce cas, le refroidissement radiatif au sommet de la couche limite est faible ; la convection est provoquée par le chauffage de la couche de surface de l'océan qui absorbe une partie du rayonnement solaire incident.

Ces exemples d'auto-organisation sont courants dans l'atmosphère (Garay *et al.*, 2004). On peut d'ailleurs trouver des situations où les cellules fermées et ouvertes cohabitent (figure 4). De plus, ces structures peuvent se maintenir pendant toute une journée, ce qui montre leur grande stabilité (on pourra visionner la vidéo disponible sur le site internet de la revue).

On arrive assez bien à reproduire les cellules ouvertes et fermées dans les modèles atmosphériques, dès lors que ceux-ci ont une résolution spatiale suffisante (large-eddy simulations en anglais ; se référer par exemple à Wang et Feingold, 2009a, b). On peut observer sur les images satellitaires une transition entre cellules fermées et cellules ouvertes (figure 5, à droite). Dans la pratique, des cellules qui sont initialement fermées peuvent se transformer en cellules ouvertes mais l'inverse n'est généralement pas observé.

La transition entre cellules fermées et ouvertes s'explique par le rôle de la précipitation (figure 5, à gauche). La pluie engendrée par le nuage s'évapore et refroidit la couche d'air sous le nuage, ce qui conduit à un « découplage » de la couche limite : le nuage n'est plus alimenté en vapeur d'eau depuis la surface, entraînant sa disparition partielle (figure 5, B et C). Les régions de subsidence peuvent alors s'agrandir aux dépens des régions d'ascendance (figure 5, D) jusqu'à la disparition complète des nuages (figure 5, E). On passe alors d'une couche limite contrôlée par un refroidissement au sommet de la couche nuageuse à une couche limite contrôlée par le bilan radiatif de la surface.

Le rôle des aérosols

Des simulations numériques montrent que la concentration en aérosols peut influencer sur le caractère ouvert ou fermé des cellules de Bénard, en favorisant ou supprimant le développement de la précipitation, même si, dans la réalité, la dynamique de grande échelle joue sans doute un rôle plus important que les

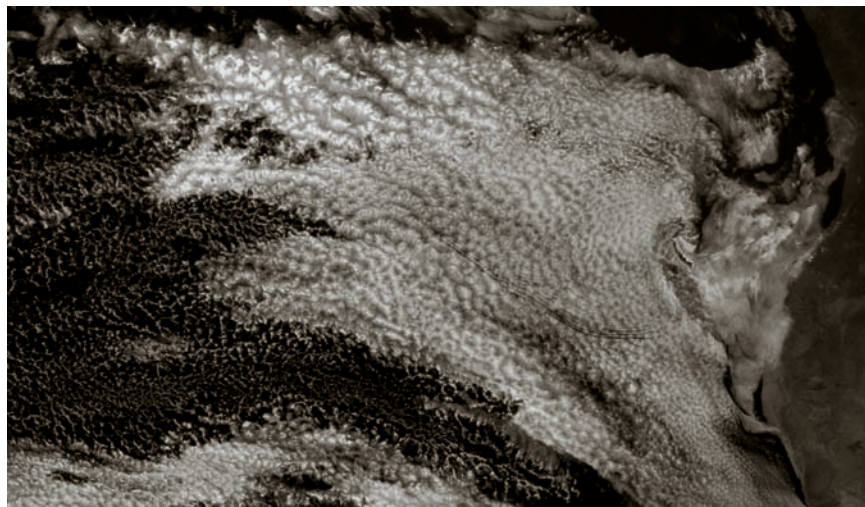


Figure 4. Photo satellitaire de *Meteosat-7* dans le canal visible au large de la Namibie le 23 août 2001 à 12 h 00 UTC. On remarque la coexistence de cellules fermées et ouvertes, ainsi que des ondes de gravité qui impriment des lignes sur les cellules fermées. Repris et adapté de http://www.eumetsat.int/website/home/Images/ImageLibrary/DAT_IL_01_08_23.html Un film montrant l'évolution de cette situation météorologique de 7 h 30 à 16 h 00 UTC avec un pas de temps de 30 minutes est disponible sur le site internet de la revue. © Eumetsat.

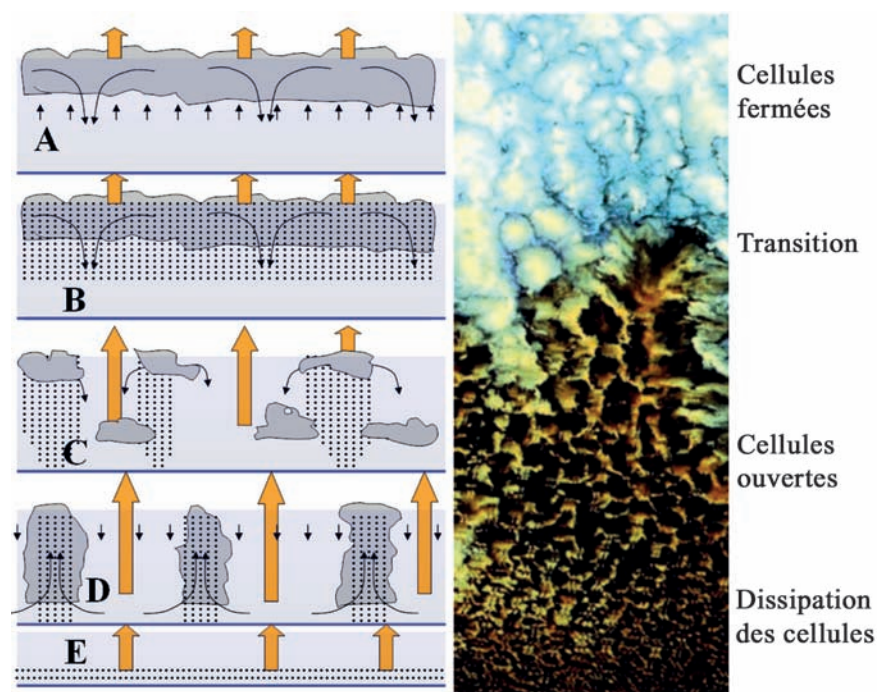


Figure 5. Représentation schématique des processus gouvernant la transition entre cellules fermées (A) et ouvertes (D), pouvant aller jusqu'à la dissipation des cellules (E). La pluie est représentée par des pointillées, les mouvements d'ascendance et de subsidence par des flèches noires et le refroidissement radiatif par des flèches oranges. Reproduit de Rosenfeld *et al.* (2006). Creative Commons Licence.

aérosols (Noteboom, 2007). Une atmosphère riche en aérosols conduit à des concentrations en gouttelettes élevées et donc à des gouttelettes plus petites, ce qui ralentit la formation de gouttes suffisamment grosses pour précipiter. Cela favorise donc des cellules de convection fermées. À l'inverse, une atmosphère pauvre en aérosols conduit à des concentrations en gouttelettes faibles, et donc à des gouttelettes plus grosses, ce qui facilite la formation de précipitation. Cela favorise donc des cellules de convection ouvertes.

Prolongements possibles

Cette expérience peut être utilisée à différents niveaux. Elle peut servir de manière ludique lors d'événements tels que la fête de la science ou des visites d'élèves de collège ou lycée dans les laboratoires de sciences de l'atmosphère et de climat. Dans le cadre de travaux d'initiative personnelle encadrée (Tipe), les étudiants peuvent explorer des gammes de paramètres

(température, taux de refroidissement ou de chauffage, hauteur de liquide) et leurs éventuels impacts sur la formation et les caractéristiques des cellules. Pour les étudiants de licence ou de master, l'expérience peut servir d'introduction à des travaux pratiques sur la simulation numérique de la couche limite. L'organisation en cellules fermées ou ouvertes est en effet un exemple de bistabilité. L'article de Koren et Feingold (2011) peut alors fournir une base pour explorer numériquement un système dynamique très simplifié des interactions aérosols-nuages-précipitation dans la couche limite.

Bibliographie

- Garay M.J., Davis R., Averill C., Westphal J.A., 2004. Actinoform clouds: Overlooked examples of cloud self-organization at the mesoscale. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85, 1585-1594.
- Koren I., Feingold G., 2011. Aerosol-cloud-precipitation system as a predator-prey problem. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 12227-12232.
- Noteboom S., 2007. Open cell convection and close cell convection. Disponible à l'adresse : http://www.knmi.nl/bibliotheek/stageverslagen/stageverslag_Noteboom.pdf
- Okubo T., 2009. Convective and sedimentation dissipative patterns of Miso soup. *Colloid Polym. Sci.*, 287, 167-178.
- Okubo T., Okamoto J., Tsuchida A., 2009. Convective, sedimentation, and drying dissipative patterns of coffee in the presence of cream and in its absence. *Colloid Polym. Sci.*, 287, 351-365.
- Rosenfeld D., Kaufman Y.J., Koren I., 2006. Switching cloud cover and dynamical regimes from open to closed Benard cells in response to the suppression of precipitation by aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2503-2511.
- Wang H., Feingold, G. 2009a. Modeling mesoscale cellular structures and drizzle in marine stratocumulus. Part I: Impact of drizzle on the formation and evolution of open cells. *J. Atmos. Sci.*, 66, 3237-3256.
- Wang H., Feingold G., 2009b. Modeling mesoscale cellular structures and drizzle in marine stratocumulus. Part II: The microphysics and dynamics of the boundary region between open and closed cells. *J. Atmos. Sci.*, 66, 3257-3275.



MOOC CLIMAT
Causes et enjeux du changement climatique

Référent scientifique : Hervé LE TREUT (Professeur à l'UPMC et Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace)
Sous le parrainage de Jean Jouzel (Directeur de recherche au CEA, président de Météo et Climat)

Début de la 1ère session du cours : 19 octobre 2015
Inscriptions : du 20 juillet au 22 novembre 2015

<https://www.france-universite-numerique-mooc.fr/courses/uvved/34003/session01/about>